# 作物三维重构技术研究现状及前景展望

朱荣胜[1]，李　帅[2]，孙永哲[2]，曹阳杨[2]，孙　凯[2]，郭益鑫[2]，姜伯峰[2]，
王雪莹[2]，李　杨[1]，张战国[1]，辛大伟[3]，胡振帮[3]，陈庆山[3*]

（1. 东北农业大学 理学院，黑龙江哈尔滨 150030；2. 东北农业大学 工程学院，黑龙江哈尔滨 150030；
3. 东北农业大学 农学院，黑龙江哈尔滨 150030）



**摘　要：**近年来，随着无人机和各类传感器在作物育种和田间生产中被广泛使用，作物表型组学得到了极大的发展。兼具了高精度、高通量和高度自动化的作物表型组学及其相关技术的发展，加快了新品种的选育和优化了田间管理。作物三维重构技术是作物表型组学最基本的技术方法之一，是精准描述作物形态全息结构的重要工具，而作物的三维重构模型对于高通量作物表型获取、作物株型特征评价、植株结构和表型相关性分析等均具有重要意义。为深入总结作物表型中三维重构技术研究进展，本文从作物三维重构的基本方法与应用特点、研究现状和前景展望等三个方面展开综述。本文首先归纳整理了现有作物三维重构方法，并对各类方法的基本原理进行了综述，分析了各类方法的特点和优缺点，同时在归纳作物三维重构方法一般性流程的基础上，对各类方法的适用性进行剖析，归纳整理出了各类方法在实施时的具体流程和注意事项；其次，本文依据研究目标对象不同将作物三维重构的应用分为单株作物重构、田间群体重构和根系重构三部分，并从这三个视角对作物三维重构技术的应用情况进行了综述，依据精度、速度和成本三方面，探究了各个方法对于不同作物三维重构的研究现状，分析整理出不同重构对象背景下作物三维重构存在的问题与挑战；最后，从作物三维重构全程自动化、4D表型的构成、作物虚拟生长与模拟育种和智慧农业发展等方面对作物三维重构技术的前景进行了展望。

**关键词：**作物；三维重构；表型组学；作物根系；三维扫描仪

**中图分类号：**S-1　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**202102-SA002

引用格式：朱荣胜，李帅，孙永哲，曹阳杨，孙凯，郭益鑫，姜伯峰，王雪莹，李杨，张战国，辛大伟，胡振帮，陈庆山．作物三维重构技术研究现状及前景展望[J]. 智慧农业(中英文), 2021, 3(3): 94-115.

ZHU Rongsheng, LI Shuai, SUN Yongzhe, CAO Yangyang, SUN Kai, GUO Yixin, JIANG Bofeng, WANG Xueying, LI Yang, ZHANG Zhanguo, XIN Dawei, HU Zhenbang, CHEN Qingshan. Research advances and prospects of crop 3D reconstruction technology[J]. Smart Agriculture, 2021, 3(3): 94-115. (in Chinese with English abstract)

## 1　引　言

作物生长发育过程中的形态特征是作物育种研究和田间生产管理过程中不可或缺的重要信息。传统的作物形态信息获取是通过人工来完成的，存在着易出错、高误差和耗时长等一系列问题，这些问题成为加速育种进程和优化田间管理的障碍[1]。现代科学技术的发展，特别是传感器

收稿日期：2021-02-01　修订日期：2021-09-20

基金项目：国家自然科学基金面上项目（31471516）

作者简介：朱荣胜（1975—），男，博士，副教授，研究方向为作物表型组学。E-mail：rshzhu@126.com。

*通讯作者：陈庆山（1973—），男，博士，教授，研究方向为大豆分子育种。电话：13384605488。E-mail：qshchen@126.com。

技术和计算机视觉技术的发展，使得通过高通量、高精度和高度自动化的方法来实现获取作物形态特征信息成为可能，而作物三维重构技术就是实现这一可能的一种重要技术手段[2]。

三维重构技术是一种虚拟现实技术，即通过数据采集、预处理、点云配准、数据融合和纹理添加等一系列过程，在计算机中对完成现实实物虚拟重建的一项技术，其在工业和医疗领域应用极广，社会价值巨大，但在农业领域由于受到场景条件、对象复杂度和高昂费用的影响，发展较为缓慢[3]。直到近些年，传感器技术和计算机视觉技术的高速发展，使得这一领域的仪器设备成本大幅下降的同时，适应复杂环境和场景的高精度重构算法也得到了极大的发展，并在不同农业场景下的作物三维重构探索和研究中逐渐开展[4]。截止到2021年9月9日，在Web of Science上以“crop 3d reconstruction”为关键词，共检索到383篇期刊文献，其中316篇为近5年发表，由此可见，作物三维重构及其相关领域的研究热度在近几年是非常高的。

目前，已有张建等[5]、刘刚等[6]、李林[7]、Li等[8]、Wulder等[9]对作物三维重构方法进行了归纳分析研究，分别对作物三维重构方法的分类、原理和应用等进行了综述和整理，但都未系统地对各类方法进行特点分析。为了探究不同方法对于单株作物、田间群体作物以及作物根系三维重构的应用适宜性，本文首先从作物三维重构方法的分类与基本流程展开综述，归纳并整理了各种重构方法的特点，并比较了不同方法的优缺点；之后总结了玉米、水稻、大豆、小麦等单株作物、田间群体作物以及作物根系三维重构研究现状，指出了存在的问题与挑战；最后对三维重构技术的未来应用前景进行了展望。

## 2 作物三维重构方法

作物三维重构是指通过计算机图形学、机器视觉等方法将植物的整体形态及拓扑结构进行建模和可视化。由于不同农作物的生长环境及生理特性不同，其形态拓扑结构也有很大的差异，因此建立精确的作物三维形态模型一直是农学、计算机图形学等方面的研究热点[10-12]。

### 2.1 作物三维重构方法分类与基本流程

根据研究的取样方法和重构方法，可将农作物的三维重构大致分为基于规则的方法、基于图像的方法、基于三维扫描仪的方法和基于数字化仪的方法四种[13,14]，如图1所示。每个方法具有不同的数据采集、数据处理和建模流程。本文分析了不同方法的使用流程和主要理论工具，总结出具有普适性的作物三维重构一般方法。

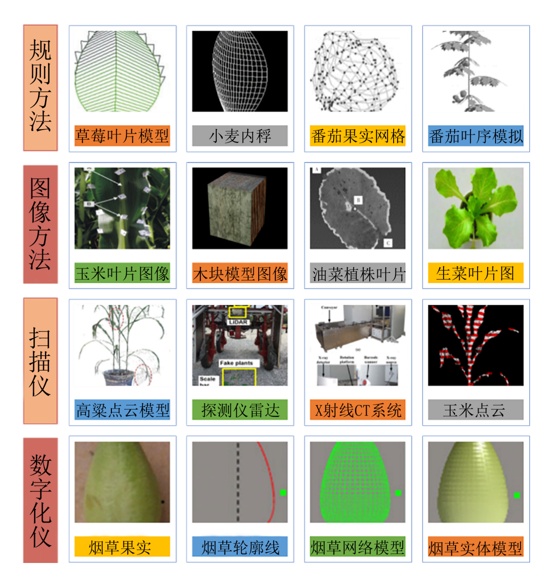



图1 作物重构方法的分类[15,16]

Fig. 1 Classification of crop reconstruction methods[15,16]

目前作物三维重构的相关研究主要分为三个步骤：一是确定重构对象，包括整体植株或主要器官；二是选择目标植株信息获取方法和三维重构方法；三是通过三维重构体进行相应植株模型参数的提取，进而应用到农业精准化管理领域。作物三维重构的基本流程如图2所示。

#### 2.1.1 基于规则的方法

基于规则的方法是指通过动态结构模型分析植物实际生长发育过程中的拓扑结构和几何形态的变化规律。此方法同时能够在田间和实验室内完成。对于某种特定的植物，可以改变模型的参数得到植物的多种生长形态结构。目前最常用的

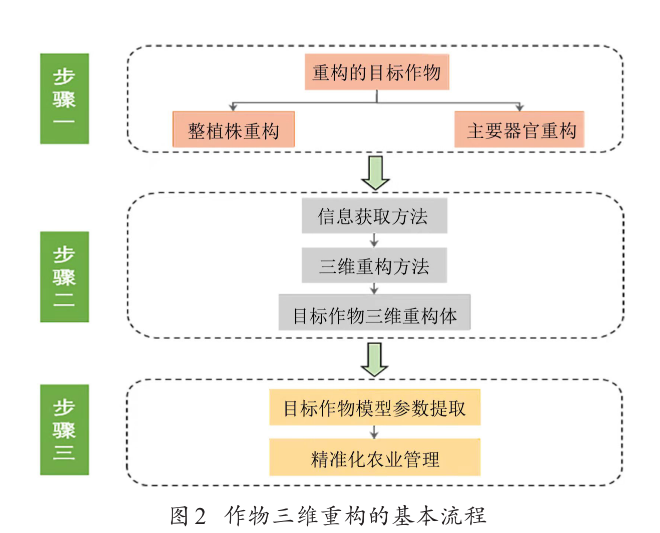



图2 作物三维重构的基本流程

Fig. 2 Basic process of crop 3D reconstruction

动态结构模型有L系统[16-18]和自动机模型[6,19]。作物的生长拓扑结构可以通过该方法被形象反应出来，并且可以通过改变参数进行调节生长的结构形态。但是这种方法较为复杂，在运用时由于受人为因素的影响会产生误差，因此重构的形态结构与实际的作物生长的拓扑结构有较大的误差。

基于规则方法的流程主要包括数据的获取、数据处理、三维重建的方法选择和表型提取。近几年开始出现使用相机或三维数字化仪获取数据，一定程度上减少了获取数据的工作量。数据的处理随着获取数据的不同而变化。基于规则方法的基本流程如图3所示。

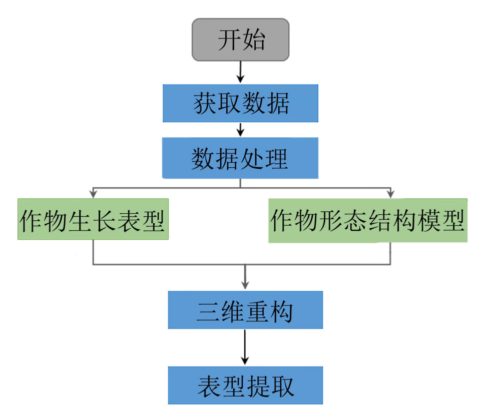



图3 基于规则方法的作物三维重构基本流程

Fig. 3 Basic process of crop 3D reconstruction based on rule method

### 2.1.2 基于图像的方法

基于图像的方法是指通过相机获得目标植株的二维图像，首先利用图像识别与处理方法对获得的图像进行预处理，然后利用模式识别、机器视觉等方法实现目标植株的三维重构，可分为单目视觉系统、双目视觉系统和多目视觉系统。单目视觉系统通常要求的条件比较理想化，重建效果及精度一般，因此在植物三维重建领域的应用极少[20]。目前比较常用的是双目视觉系统和多目视觉系统。双目立体视觉空间定位的几个关键技术主要包括图像采集、摄像机标定、图像预处理、边缘特征提取和立体匹配等[21]。多目视觉则是在双目视觉的基础上，通过添加多台相机来避免由于基线距离增大所造成的遮挡等问题。Nguyen等[22]描述了一种用于植物表型获取的田间三维重构系统。该系统利用同步、多视角、高分辨率彩色数字图像对作物进行真实的三维重建，成功地获取到了植物冠层几何形态的特征参数。

基于图像的方法能够通过作物图像获取到植株的详细信息，并且能够通过一些相关算法提取得到作物的表型参数。对于单株植物三维重构时，该方法比较适合用于实验室内无风光照充足的环境[23,24]。对于研究作物整体冠层体积时，该方法也能够在田间环境下进行三维重构[25,26]。

由于基于图像的方法具有所需设备简单、能够快速有效建立模型、人机交互少的特点，已经成为计算机视觉和计算机图形学领域的研究热点[27]。图4展示了基于图像的方法进行作物三维重构的流程图，图5展示了基于图像的大豆三维重构流程图。

### 2.1.3 基于仪器的方法

基于仪器的方法目前主要指基于三维扫描仪和三维数字化仪进行作物的三维重构。

基于三维扫描仪的方法是指在一些取样平台上使用其扫描整株植物，则可以得到整体植株的三维位置信息。目前在作物三维重构领域应用最多的就是三维扫描仪[28-32]。例如，Lee和

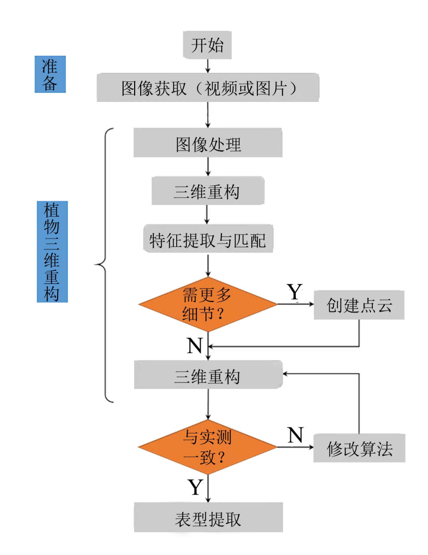



图4 基于图像方法的作物三维重构基本流程

Fig. 4 Crop 3D reconstruction basic process based on image

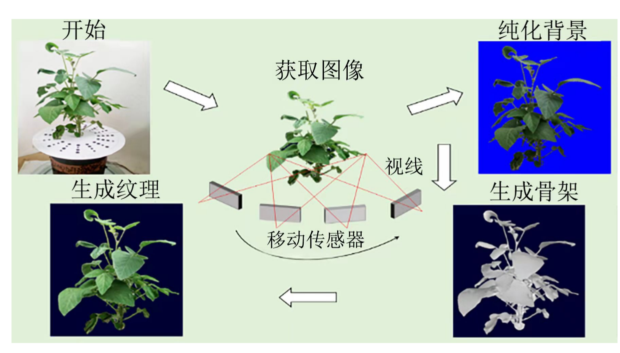



图5 基于图像方法的大豆三维重构示例[15]

Fig. 5 Example of soybean 3D reconstruction based on image

Ehsani[33]使用扫描技术实现了柑橘树表型参数量化。Raumonen等[13]通过扫描仪实现了树木冠层的参数获取以及三维重构。Paulus等[14]研究了利用高精度激光扫描仪与可移动关节测量臂在亚毫米尺度下直接获取非侵入性的三维数据。Omasa和Konishi[34]利用三维激光雷达成像技术来估计植物的特性，如冠层高度、冠层结构、碳储量和物种等，并通过回顾激光雷达系统的发展及从叶到冠层遥感的应用来评估植物的生长和形态反应。

三维数字化仪在农业领域的应用也越来越多，其主要由探头、扫描装置和处理软件组成，其能够快速获取目标植株的三维空间形态坐标并能够快速地使用相应的软件进行三维重构[20,35]。

基于仪器方法的作物三维重构基本流程如图6所示。

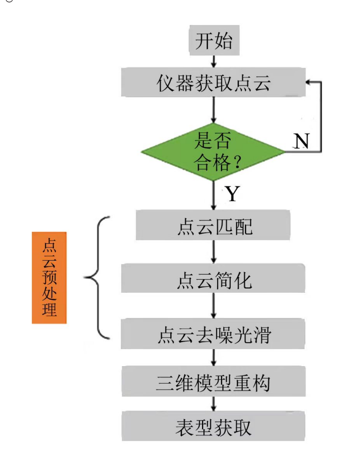



图6 基于仪器方法的作物三维重构基本流程

Fig. 6 Fundamental flow based on instrumental methods

基于三维扫描仪和基于三维数字化仪的方法获取数据速度比较快、对植物没有损伤并且得到的三维点云数据量比较大，高度保留了植株体的颜色信息和纹理信息，还原度比较高。但是三维扫描仪获得的点云数据量大，处理起来相对费时并且设备价格昂贵，这是该方法目前所面临的问题[12]。同时，这两种方法对环境有较高要求，尤其是激光扫描仪在扫描时不允许激光发射器的周围有金属物体，在暗室中使用测量效果比较好，即使通过该方法在田间进行重构也需要在封闭环境下进行，因此在一定程度上限制了其应用。此外，基于三维扫描仪和数字化仪获取的原始三维点云数据存在大量冗余且无关的信息，因此需要对原始点云进行处理。方志力等[36]将植株放在空旷的环境中，实现了目标点云与无效数据在空间上的无连续性，接着运用阈值分割方法分离了目标点云与背景噪声。

目前，3D信息采集仪器已经变得越来越经济高效，并通过使用先进的技术设备为更有效的农业实践提供了新的机会。

## 2.2 作物三维重构方法的特点分析

总结上面综述内容，对各种方法的特点进行归纳总结，结果见表1。

**表1 作物三维重构方法的技术特点**

Table 1 Technique characters of crop 3D reconstruction

| 方法类别 | | 方法特点 | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 采样速度 | 采样方式 | 重构速度 | 重构精度 | 使用复杂程度 | 设备价格 | 受环境影响程度 |
| 基于规则的方法 | | 快 | 不采样或人工 | 快 | 低 | 易 | 低 | 小 |
| 基于视觉图像的方法 | | 快 | 视觉传感器 | 一般 | 高 | 易 | 较低 | 大 |
| 基于仪器的方法 | 三维扫描仪 | 快 | 激光或深度相机 | 快 | 一般 | 易 | 高 | 小 |
| | 三维数字化仪 | 慢 | 接触式传感器或探头 | 一般 | 高 | 复杂 | 高 | 大 |

在对大量的文献进行整理时发现：(1）基于规则的作物三维重构方法的核心是动态模型，所以三维模型的采样量比较少甚至有时必须要采样，而重构的速度一般都比较快，哪怕比较复杂的规则或模型，重构速度一般也较快，而过度依赖于算法和规则的重构模型则精度不高，同时受环境的影响也较小；(2）基于视觉图像的三维重构方法通过相机等视觉传感器进行采样，尽管所需图像较多，但采样的速度比较快，由于重构时需要去噪和纯化目标对象，所以图片的预处理时间较长，另外基于图片的三维模型生成算法要同时针对大量图片进行处理，所以重构的速度不快，此方法受环境光线和背景复杂度的影响比较大；(3）同样是基于仪器的三维重构方法，三维扫描仪和三维数字化仪的差别很大，前者一般以位置传感器或激光雷达作为主要的采样装置，采样速度较快，后者使用接触式传感器，采样速度较慢；三维扫描仪的重构速度较快，而三维数字化仪由于使用和测量过程复杂，使得整个的重构速度较慢；三维扫描仪的重构精度较三维数字化仪要低，目前，三维数字化仪的重构结果仍被认为是作物三维重构的标准。上述三类方法的优缺点见表2。

**表2 各类作物三维重构方法的优缺点**

Table 2 Advantages and disadvantages of crop 3D reconstruction methods

| 方法类别 | | 代码 | 类型 | 具体描述 |
|---|---|---|---|---|
| 基于规则 | | A1 | 优点 | 采样简单速度快、使用容易、受环境影响小、成本低 |
| | | B1 | 缺点 | 精度低 |
| 基于图像 | | A2 | 优点 | 采样速度快、使用较容易、重构精度高、成本低 |
| | | B2 | 缺点 | 预处理时间长、受环境影响大、重构速度一般 |
| 基于仪器 | 1）三维扫描仪 | A3 | 优点 | 采样速度快、使用简单、受环境影响小 |
| | | B3 | 缺点 | 重构精度不高、重构速度一般、成本高 |
| | 2）三维数字化仪 | A4 | 优点 | 重构精度高 |
| | | B4 | 缺点 | 采样速度慢、重构速度一般、使用较复杂、受环境影响大、成本高 |

注：A为优点；B为缺点

## 3 主要作物三维重构技术应用研究现状

作物三维重构技术按其应用对象不同可分为单株作物三维重构（地上单株）、田间作物群体三维重构（地上群体）和作物根系三维重构（地下根系系统）。对单株作物重构是对作物的三维形态结构做精细化构造，这样的三维点云模型的点云在百万级别。主要侧重叶面积、叶倾角、叶宽、叶长、株高、节间距等精细化的表型数据分析；田间作物群体三维模型是以田间群体为目标进行三维重构，目的在于获取田间群体冠层水平的相关表型，比如叶面积、叶面积指数、叶倾角、冠幅和冠高等；对作物根系三维重构是以获

取根系相关表型和研究根系构型为主要目标的，由于在常规土壤介质中根系是肉眼不可见的，所以取样手段较常规地面上重构复杂，往往需借助CT或核磁共振。基于参考文献［37-45］总结得到作物三维重构应用的具体划分情况如图7。下面将从单株作物、田间群体作物和作物根系这三方面来对作物三维重构技术的研究现状进行综述。

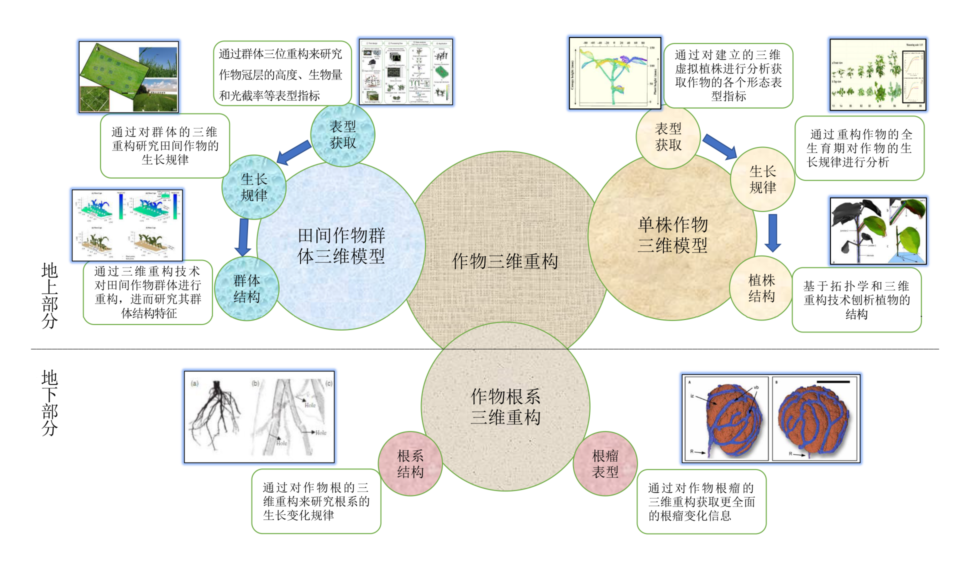



图7　作物三维重构的主要应用

Fig. 7  Main applications of crop 3D reconstruction

## 3.1 单株作物三维重构

### 3.1.1　研究现状

单株作物三维重构是无损研究单株作物形态结构和生长变化规律的重要信息技术手段，而基于三维模型的作物单株表型获取不仅为分子和表型间的关联分析提供重要的数据支持，同时也是其他应用的前提和基础。单株三维重构是作物三维重构最基本的问题，对单株三维模型的解析不仅为研究作物形态发育和植株结构提供重要信息，同时也为作物模拟生长和模拟育种提供重要的数据基础。

本节对玉米、大豆、小麦、棉花、水稻、油菜、番茄以及其他单株作物三维重构研究进展进行了归纳总结，详细阐述了不同作物相对应的三维重构方法中的硬件系统和软件系统，并分析和比较不同方法的优缺点。具体见表3。

**表3　单株作物三维重构相关研究**

Table 3  Researches on 3D reconstruction of single crop

| 作物 | 采样设备和方法 | 重构方法 | 优缺点 | 参考文献 |
|---|---|---|---|---|
| 玉米 | 单反相机 | SFM算法、SIFT算法、SVM算法 | A2、B2 | Zhu等(2020)[39] |
| | 三维扫描仪 | Kinect | A3、B3 | 方志力等(2017)[36] |
| | 三维扫描仪 | LiDAR、LabVIEW程序 | A3、B3 | Thapa等(2018)[46] |
| | 三维扫描仪 | Geomagic Studio 2014、DoN法线差分算法 | A3、B3 | 苏伟等(2019)[47] |
| | 三维扫描仪 | 扫描仪、Gemomagic Spark | A3、B3 | 李抒昊等(2018)[48] |
| | 三维扫描仪 | 扫描仪、三角剖分法 | A3、B3 | 王勇健等(2014)[49] |
| | 三维扫描仪 | Alpha-Shape算法、移动立方体算法 | A3、B3 | 刘睿等(2014)[50] |
| | 三维扫描仪 | B样条曲线、多直线分裂算法 | A3、B3 | 肖伯祥等(2007)[28] |

续表3

| 作物 | 采样设备和方法 | 重构方法 | 优缺点 | 参考文献 |
|---|---|---|---|---|
| | 双目视觉系统 | 双三次B样条曲线 | A2、B2 | 李辉(2016)[51] |
| | 双目视觉系统 | Cardinal样条插值函数 | A2、B2 | 王传宇等(2010)[52] |
| | 多目立体视觉 | MVS- Pheno平台 | A2、B2 | Wu等(2020)[15] |
| | 三维数字化仪、激光雷达 | VC++、OpenGL库 | A4、B4 | 程锦和劳彩莲(2009)[29] |
| | 手持式的FastSCAN扫描仪 | 基于网格方法的自适应密度三维点云简化方法和玉米植株双边滤波算法 | A3、B3 | Ma等(2019)[45] |
| 大豆 | 单反相机 | 3DSOM、MATLAB拟合 | A2、B2 | Zhu等(2020)[44] |
| | 数码相机 | 三次样条曲线、L系统 | A2、B2 | 宋祺鹏等(2017)[53] |
| | 人工测量 | MATLAB拟合、L系统 | A1、B1 | 刘占风等(2008)[16] |
| | 三维扫描仪 | 三次样条曲线、Delaunay三角剖分 | A3、B3 | 谢秋菊等(2011)[54] |
| | 人工测量 | MATLAB拟合、L系统 | A1、B1 | 郑萍等(2006)[55] |
| 小麦 | 单反相机 | SIFT算法、SFM算法、MVS算法 | A2、B2 | 史维杰等(2019)[56] |
| | 单反相机 | MVS-SFM算法 | A2、B2 | Duan等(2016)[57] |
| | 工业相机 | 3DSOM、GPU、OpenCV | A2、B2 | Fang等(2016)[58] |
| | 相机拍摄 | 边缘检测、生长曲线约束 | A2、B2 | 胡少军等(2007)[59] |
| | 人工测量 | 非均值有理B样条、OpenGL库 | A1、B1 | 李书钦(2017)[60] |
| | 人工测量 | 形态模型、NURBS曲面、OpenGL库 | A1、B1 | 李书钦等(2016)[61] |
| | 人工测量 | NURSS曲面 | A1、B1 | 李书钦等(2016)[62] |
| | 人工测量 | 生长模型、VC++、OpenGL库 | A1、B1 | Zhang等(2012)[63] |
| | 三维扫描仪 | 离散平滑$D_2$-样条曲面拟合 | A3、B3 | Kempthorne等(2015)[64] |
| 棉花 | 双目视觉系统 | SIFT算法 | A2、B2 | 柏月等(2017)[65] |
| | 双目视觉系统 | OpenCV、Adaboost算法、SIFT算法 | A2、B2 | 韩大龙(2014)[66] |
| | 人工测量 | NURBS曲面、VC++、OpenGL库 | A1、B1 | 杨娟等(2006)[67] |
| | 三维扫描仪 | LiDAR和RTK-GPS | A3、B3 | Sun等(2018)[31] |
| | 人工测量 | COTGROW模型、GroIMP平台 | A1、B1 | 陈超等[68] |
| 水稻 | 单反相机 | SFM算法、CMVS算法、PMVS算法 | A2、B2 | 宋时德等(2017)[69] |
| | 激光雷达 | Crop 3D平台 | A1、B3 | Guo等(2017)[70] |
| | Light Stage平台 | 计算机视觉、移动立方体算法 | A1、B3 | 孟耀华等(2014)[71] |
| | 人工测量 | 形态模型、VC++、OpenGL库 | A1、B1 | 何火娇等(2009)[72] |
| | 人工测量 | 生长模型、生长度日(GDD)、VC++ | A1、B1 | 徐其军等(2010)[73] |
| | 平板扫描仪 | 样条曲线 | A3、B3 | 汪丽萍等(2017)[74] |
| | 相机拍摄 | 3DSOM | A2、B2 | 张楠(2013)[75] |
| | 数字成像系统 | RootReader3D | A3、B3 | Clark等(2011)[76] |
| | 单反相机 | OpenCV、Marching Cubes方法 | A2、B2 | 吴茜(2012)[77] |
| 油菜 | 三维扫描仪 | Delaunay三角网格化算法 | A3、B3 | 史蒲娟等(2017)[78] |
| | 三维扫描仪 | 迭代最近点算法、基于可视化类库VTK | A3、B3 | 方慧等(2013)[79]、李冬等(2013)[80] |

续表3

| 作物 | 采样设备和方法 | 重构方法 | 优缺点 | 参考文献 |
|---|---|---|---|---|
|  | 人工测量 | 3次Bézier曲面、L系统 | A1、B1 | 赵丽丽等(2011)[17]、欧中斌(2007)[81] |
|  | 人工测量 | 生长度日(GDD)、VC++、OpenGL库 | A1、B1 | 岳延滨(2010)[82] |
|  | 单目视觉系统 | MVS、SIFT、PMVS算法 | A2、B2 | 史蒲娟等(2017)[78] |
| 番茄 | 相机拍摄 | hue-invariant模型 | A2、B2 | Ran等(2013)[83] |
|  | 相机拍摄 | L-系统、Kinect数字化、VC++、OpenGL库 | A2、B2 | 彭永石(2007)[18] |
|  | 人工测量 | 悬臂梁弯曲模型、马尔科夫算法、贝塔分布 | A1、B1 | 董乔雪等(2010)[84] |
|  | 人工测量、三维扫描仪 | 网格模型、B样条曲线 | A1、B1 | 袁晓敏等(2012)[85,86] |
|  | 人工测量 | L系统公式集、VC++、OpenGL库、Bezier曲面 | A1、B1 | 辛龙娇等(2014)[87] |
| 草莓 | PMD深度相机、彩色相机 | 深度信息步进方法、Harris算子 | A2、B2 | 刘刚等(2017)[88]、张雪等(2017)[89] |
|  | 人工测量 | 球B样条曲线 | A1、B1 | 赵丽丽等(2011)[90] |
|  | 人工测量 | MATLAB中的interp函数、quad函数、surf函数等进行曲线、曲面的拟合 | A1、B1 | 祁力钧等(2013)[91] |
| 黄瓜 | 显微照相机 | 仿射变换、VTK | A2、B2 | 陈学峰等(2009)[92] |
|  | 单反相机、三维扫描仪 | 豪斯多夫距离、SFM与MVS | A2、B2 | 胡鹏程等(2015)[93] |
|  | 人工测量 | 3次Bézier曲面算法、L系统 | A1、B1 | 杨沛和何东健(2010)[94]、方小勇等(2006)[95] |
|  | 数码相机 | SIFT算法、B样条曲线、Delaunay网格算法 | A2、B2 | 杨亮等(2009)[96] |
|  | 三维数字化仪 | 参数化方程、Delaunay网格化算法 | A4、B4 | 陆声链等(2017)[97] |
| 辣椒 | 三维数字化仪 | B样条曲线、NURBS曲面、T样条曲线 | A4、B4 | 乔桂新等(2012)[98] |
|  | 人工测量 | 有效积温—Logistic方程 | A1、B1 | 赵泽英等(2012)[99] |
|  | 人工测量 | Bézier算法、Wang Tiles算法、三维Morphing | A1、B1 | 郭明伟(2010)[100] |
| 葡萄 | 三维数字化仪 | DUS知识库规则 | A4、B4 | 温维亮等(2015)[101] |
| 生菜 | 三维扫描仪 | 器官模板技术 | A3、B3 | 温维亮等(2011)[102] |
|  | 单反相机 | 边缘检测算法、Nurbs曲面、OpenGL库 | A2、B2 | 孔繁爽等(2015)[103] |
| 烟草 | 三维数字化仪 | B样条曲线、插值样条曲线 | A4、B4 | 王芸芸等(2010[104]、2013[105]) |

从表3中不难看出，从作物单株重构方法应用总体上来看，2010年前的研究基于规则的方法较多，2010年后，双目和多目视觉随着计算机技术和算法水平的提高其应用越来越普及，到2015年后，集成了采集和重构功能的三维扫描仪应用越来越多，集成化三维重构技术是简化重构过程，是使重构技术得到推广和普及的重要过程。

### 3.1.2 问题与挑战

目前，不同重构对象背景下作物三维重构仍存在着诸多问题与挑战。本节对目前玉米、大豆、小麦、棉花、水稻、油菜、番茄以及其他单株作物三维重构方法仍存在的问题与挑战进行了归纳总结。

（1）玉米。玉米植株的冠层结构、叶片的空间分布状况影响冠层$CO_2$的传输和光截获能力，对生长发育、抗逆性及产量产生很大影响。因此，选择一种能够高效、准确地获取和重建玉米三维形态结构的方法对于玉米的精准化管理具有重要意义，主要使用的有基于规则的方法、基于图像的方法和基于三维扫描仪的方法。玉米由于植株较高，双目和多目视觉系统的校准位置会受到影响，所以实验当中多采用了三维扫描仪来完

成植株的三维重建，但仍存在实验费时并且设备价格昂贵，实验对环境要求较高等方面的问题。

（2）大豆。大豆生产是群体生产，大豆的群体结构会直接影响到最终的产量。目前，大豆植株精准化管理的挑战之一是如何获得大豆生长期的精准三维形态结构，为进一步提高大豆产量奠定基础。由于大豆植株株型复杂、叶片和花朵密集等原因，目前国内外对大豆植株三维重构的研究很少，这也是现在很多研究者研究的一个难点。人们用了多种方法进行了尝试重构，但还没有方法在重构大豆植株时展现出更明显的优势。目前的研究较多使用规则的方法，利用大量测得的植物信息，建立植物的生长模型，但存在大豆重构后的形态结构与实际误差较大的问题。图8为一组单株大豆三维重构效果图。

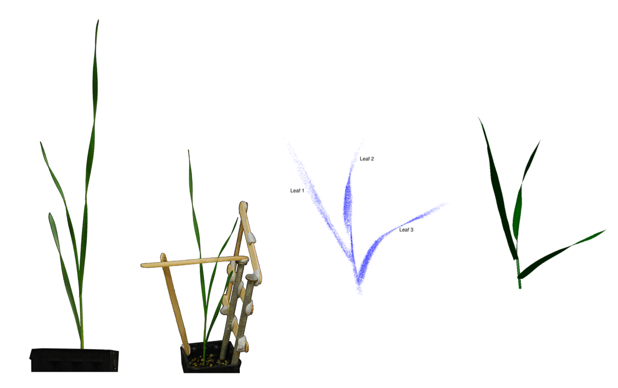





图8　单株大豆重建效果图

Fig. 8  Reconstruction results of single soybean plant

（3）小麦。小麦是世界第二大粮食作物，由于小麦形体结构复杂，存在分蘖、叶片弯曲等情况，小麦生长过程也同时受到环境条件的影响，在不同生长期的形态特征差异比较大，因此对小麦植株的三维重构以及可视化进行研究具有很大的挑战。小麦三维重构主要采用基于规则和基于图像的方法，主要原因是小麦植株矮小且结构相对简单。例如Kempthorne等[64]开发了一种新的参数化技术，它可以转换原始的人工测量数据，并且使用有限元方法将曲面表示为紧支撑形状函数的线性组合，使表面能够在新的参数空间中使用离散平滑$D_2$-样条曲面拟合实现了小麦叶片的虚拟表示，如图9所示。



(a)有支撑结构的小麦植株照片　(b)无支撑结构的小麦植株照片　(c)小麦植株扫描　(d)小麦植株的改造

图9　新型参数化技术小麦叶片三维重构结果图[64]

Fig. 9  The results of 3D reconstruction of wheat leaves [64]

（4）棉花。中国是棉花生产大国，棉花在农业经济中占有举足轻重的地位。因此，在保证棉花质量的前提下实现棉花产量的提高是目前的攻坚问题。棉花三维重构较多使用基于规则的方法和基于图像的方法。但存在重构后的形态结构与实际的作物生长的拓扑结构有误差等方面的问题。图10为棉花植株三维重构结果图。

（5）水稻。水稻在中国的经济中占有重要的地位，也是不可替代的粮食作物[106-109]。进行虚拟水稻研究，通过计算机模拟水稻的生长发育状况，建立形态结构与生理生态过程相结合的三维可视化的虚拟水稻模型，在农业生产过程中发挥着重要的增产增收和生态改良作用。水稻植株的重构在2010年前更多的应用是基于规则的方法，在2010年后更多的是基于图像（双目或多目视觉系统）来完成。目前国内外对水稻三维重构的研究越来越多，基于规则、图像或三维扫描仪等三维重构方法都有较多的运用，例如图11为利用激光雷达对水稻进行三维重构。但各种方法都

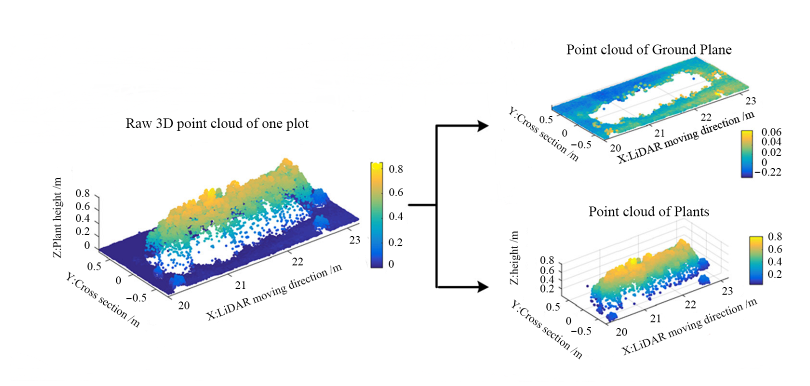
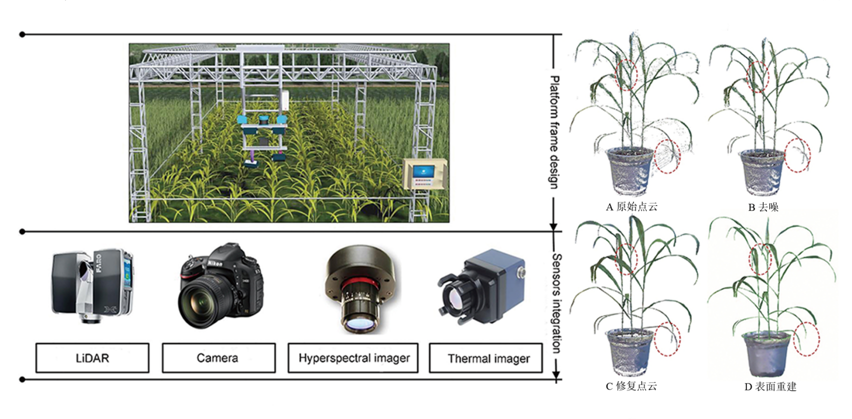



图 10　一垄行棉花植株三维重构结果图[31]

Fig. 10  3D reconstruction results of one row cotton plants[31]

存在着一定的局限性，由于水稻生长环境等因素而导致的数据处理困难等问题仍然存在。




(a) 平台框架设计以及传感器集成　　(b) 基于点云的裁剪建模过程

图 11　水稻取样设备及三维重构效果图[70]

Fig. 11  Rice sampling equipment and 3D reconstruction effect diagram[70]

（6）油菜。油菜作为现代农产品的典型代表，内部富含大量的维生素等营养物质[110]。随着计算机图形学和虚拟技术的发展，有关油菜的虚拟重构也得到了广泛关注[17]。在油菜的三维重构中，运用规则的方法和三维扫描仪的方法较多。但存在数据提取费时费力，设备价格昂贵等问题。

（7）番茄。番茄由于具备极高的食用价值一直比较受人们的欢迎[111]。在提升番茄种植的产量和质量方面，大部分科研人员逐渐将计算机图形学与农学相结合，进行虚拟番茄的研究。这样不仅仅能够改进现实番茄研究的试验周期，也能够在虚拟环境下模拟环境对番茄产量的影响。但是由于番茄自身的生长结构较为复杂，目前国内外的一些关于番茄三维重构的文献不是很多，缺少一定的研究基础。

（8）其他作物。在作物三维重构领域涉及到的作物还包括草莓、黄瓜、辣椒、葡萄、生菜、烟草等，由于研究较少，进行作物三维重构时，各自使用的方法都具有一定的局限性。

## 3.2  田间群体作物三维重构

田间作物群体三维模型的建立是实现自动化高通量田间植物群体表型获取的重要手段，是研究作物生长发育规律和作物群体结构特征及变化规律的关键技术方法之一。Moreno 等[38]利用激光雷达技术重构了葡萄群体，并提出了基于重构群体的生物量估算方法，其结果与人工测量相比效果较好；Zhu 等[39]通过多目视觉技术对大豆

和玉米田间群体进行了全生育期跟踪重构，进而通过对重构模型的分析，获取了叶长、叶宽、株高和叶面积等基本表型，基于重构的全生育期模型，对大豆和玉米的生长规律和三维冠层中的光分布规律进行了探索，得出了比较理想的结果；Burgess 等[40] 基于多目视觉系统对花生和谷子的田间间作群体结构进行三维重构，并同时估算了各自的叶面积指数，进而详细探索了花生和谷子间作的光环境和光合作用状况，其结果直接指导了田间优化种植。田间作物三维重构最直接的应用就是获取植物冠层水平的相关表型，并基于此对作物的生长发育规律和群体结构进行探讨，因此田间作物三维重构是实现田间精准农业的重要技术手段之一。表4为不同田间群体作物三维重构的相关研究。

**表4　作物田间群体三维重构相关研究**

Table 4  Researches on 3D reconstruction of crop field population

| 作物 | 采样设备和方法 | 重构方法/工具 | 优缺点 | 参考文献 |
|---|---|---|---|---|
| 玉米 | 三维扫描仪 | t分布函数 | A2、B3 | 温维亮等(2018)[112] |
| 玉米 | 三维扫描仪 | 分段曲率、VC++、OpenGL 库 | A3、B3 | 程锦和劳彩莲(2009)[29] |
| 棉花 | 双目视觉系统 | SIFT 算法 | A2、B2 | 牛顺义(2016)[113] |
| 棉花 | 人工测量 | COTGROW 模型、GroIMP 平台 | A1、B1 | 陈超等(2016)[68] |
| 棉花 | 人工测量 | 系统分析法、VC++、OpenGL 库 | A1、B1 | 周娟等(2009)[114] |
| 棉花、谷子 | 多目视觉 | FastTracer | A2、B2 | Burgess 等(2017)[40] |
| 水稻 | 人工测量 | RPTDS 软件、VC++、OpenGL 库 | A1、B1 | 孟军等(2007)[115] |
| 番茄 | 人工测量、三维扫描仪 | 网格模型、B样条曲线 | A1、B1 | 袁晓敏(2012)[86] |
| 大豆 | Kinect2.0 | MATLAB 软件、最大类间方差阈值分割法 | A2、B2 | 冯佳睿等(2019)[116] |
| 大豆、玉米 | 多目视觉 | Visual SFM | A2、B2 | Zhu 等(2020)[39] |
| 草莓 | 超声波传感 | MATLAB 软件 | A3、B3 | 祁力钧等(2013)[91] |
| 葡萄 | 激光雷达 | MATLAB 软件 | A3、B3 | Moreno(2020)[38] |
| 葡萄 | 三维数字化仪 | VegeSTAR 软件 | A4、B4 | 张洁等(2021)[117] |

三维重构技术在田间群体作物上的应用状况与在单株作物上类似，在2010年之前，多采用基于规则的方法，其优点是成本低、速度快，缺点是精度低。当对精度要求较高时，双目或多目成像系统使用较多。而在近几年，采样速度更快和重构速度更快的方法（深度相机、激光雷达、三维扫描仪）被广泛使用，这些仪器使用起来更方便简单，同时精度一般也能够达到要求（尽管不如基于图像的方法），但往往仪器价格昂贵并且耗时。基于这些方法所建立的作物群体三维模型，可以通过计算机程序快速获取目标作物群体的一系列冠层表型，如株高、冠幅和叶面积指数等[118]，从而加速作物田间品种选育和作物长势诊断的进程。

目前在作物群体三维重构的研究中存在的主要问题是初期重构结果的噪声较大，如何通过计算机视觉、深度学习技术和各类算法工具相融合，将目标作物群体从复杂的初期重构体中剥离出来是当前研究的难点和热点。

## 3.3 作物根系三维重构

无损而准确地观测作物根系的生长一直是很多植物学家期待的研究根系的一种方式，三维重构技术给这一期待提供了可能。Metzner 等[42] 利用核磁和 CT 分别对土壤介质中的根系进行了三维重构，这一工作对无损动态观测土壤介质中的根系意义重大，从而使人们能够脱离开特殊介质来研究和观察作物的根系；Livingston 等[43] 关于根系的研究更加细致微观，他们利用显微镜和光学成像系统对大豆的根瘤进行了三维重构，一举

解决了二维图像所不能描述的维管束连续或终止的问题。显然，作物根系三维重构是研究作物根系结构的重要手段，也是进一步研究作物根系根瘤分布规律的重要基础。

作物根系的三维重构是目前作物三维重构研究中难题，本文整理了近年来作物根系三维重构的研究，详见表5。

**表5　作物根系三维重构相关研究**

Table 5  Researches on 3D reconstruction of crop roots

| 作物 | 采样设备和方法 | 重构方法/工具 | 优缺点 | 参考文献 |
|---|---|---|---|---|
| 大豆 | CT、磁共振 | 体积图像算法（MAVI）软件包 | A3、B3 | Metzner等（2015）[42] |
| 水稻 | 三维扫描仪 | 霍夫变换、Ball-B样条 | A3、B3 | Fang等（2009）[41] |
| 大豆 | 光学显微镜 | Adobe After Effects软件 | A2、B2 | Livingston等（2019）[43] |
| 水稻 | 数字成像系统 | RootReader3D | A3、B3 | Clark等（2011）[76] |
| 玉米、大麦 | 磁共振 | NMRooting | A3、B3 | Van Dusschoten等（2016）[119] |
| 番茄 | CT | Roo Trak | A3、B3 | Mairhofer等（2013）[120] |
| 大麦、小麦 | CT | VG Studio MAX 2.2软件 | A2、B2 | Pfeifer等（2015）[121] |
| 大麦 | 磁共振成像 | WinRhizo软件 | A3、B3 | Pflugfelder等（2017）[122] |
| 玉米 | 单反相机 | WinRhizo、GiARoots、SmartRoot | A3、B3 | Le Marié等（2014）[123] |
| 水稻 | 三维体内成像技术 | GiA Roots | A3、B3 | Galkovskyi（2012）[124] |
| 甜菜 | 核磁共振成像 | Mevislab软件包 | A3、B3 | Metzner等（2014）[125] |
| 水稻 | CT | Genstat 15.1 | A2、B2 | Zappala等（2013）[126] |
| 番茄 | μCT | OpenVMS | A3、B3 | 毛罕平等（2019）[127] |
| 小麦 | 根系构型数字化仪 | Pro-E软件 | A4、B4 | 厉翔等（2020）[128] |

从表5中可以看出，透明介质中的根系重构一般使用的是三维扫描仪或多目视觉技术，而土壤介质中的根系重构是核磁或CT采集加软件算法合成的方法。土壤介质中根系重构是重构根系的最终目标，也是现在作物三维重构研究的热点之一，其难点在于数据采集，由于目前需要CT或核磁这样昂贵的大型设备才能够进行，所以研究的前期成本较高，目前随着CT和核磁等设备的普及，使用成本已大幅度下降，但高精度的样本采集费用仍旧昂贵。另外，基于核磁和CT采集样本的三维模型构建算法发展相对成熟，已出现了像WinRhizo等成熟的集成算法软件。随着科学技术的发展，采样设备和费用会进一步降低，这将极大地推进根系三维重构技术的发展，为生物学家更好地研究根系的形态、生理和生物学特性提供重要助力。

目前在作物根系三维重构研究中存在的问题有两个：一是应用算法生成三维重构模型之前的基础图片去噪目前无法实现自动化，模型重构成本高；二是采样设备价格昂贵。这两个问题是目前研究土壤介质中重构作物根系三维模型的两大瓶颈。

## 4　作物三维重构技术的前景展望

### 4.1　能否实现作物三维重构流程全程自动化将是制约这一技术普及的关键因素之一

无论是单株作物、田间群体和根系，作物三维重构技术的整体流程基本一致，都包括了取样、去噪、生成模型、分割和表型提取等步骤，这是一个复杂而综合的过程，需要较专业的研究人员才能够完成，到目前为止还没有全流程自动化的系统出现，这使得重构的通量很低，对有大规模表型测量需求的项目还无法完成，进而影响了该技术的普及推广。解决这一技术发展障碍的关键是开发与取样系统配套、用于实现自动去噪、能够自动生成模型、自动进行分割和自动完

成表型测量的计算机软件系统，尽管人们已经进行了大量的尝试，例如Teng等[129]、Guan等[130]、Wen等[131]人，但距离全流程自动化的实现还有相当的距离。

2016年比利时根特大学的Donné等[132]设计并开发了软硬件相结合的玉米单株三维重构和表型获取系统-PhenoVision，对自动化植株三维重构流程进行了尝试，实现了植株长、宽、高和投影面积等表型的自动获取，但对更精细的叶面积、叶倾角等表型还无法度量，而且对植株更复杂的大豆等其他作物效果一般。此外，一些公司也投入了研发三维植株生成系统，如Trait4D[133]系统，实现了小型盆栽作物从重构到表型的自动化过程，已经能够提取包括株高、冠幅在内的多种表型，但同样对精细化表型（叶面积、节数和节间距等）和复杂植株（冠层覆盖度高的植株）仍然无能为力。目前，这些问题都集中在了复杂植株重构和三维植株分割的算法设计和研发中，当前一段时间内这些算法的研究都将是作物三维重构的热点问题。

## 4.2 作物三维模型重构将成为构成作物4D表型的基本单元

当前处于信息时代，信息的载体已经突破了原有的条目数据模式。从机器视觉技术的视角，以表型描述的载体为分类依据，对作物表型进行一次重新分类，可大体分为四类。第一类是一维表型（1D表型），一般是指描述作物某一方面的一个具体度量指标，如株高、冠高、叶面积、籽粒长和宽等，这是传统作物性状表型描述的主要手段；第二类是二维表型（2D表型），2D表型已经是综合表型，主要是用照片来记录和描述作物的属性，由于二维图片的局限性，使得相应描述并不完整，如植株的俯视照片尽管能够描述植株叶片的颜色，并记录了冠层顶端花和果实的形态与数量，但并不能描述植株下层冠层的状况；作物三维表型（3D表型）即指作物三维重构模型，是描述植株外观形态全信息的综合载体，一个植株的三维模型既承载了多个1D表型，又弥补了2D表型片面性的不足，是描述作物表型的最重要方式之一。2015年，Apelt等[134]开发了Phytotyping4D系统，首次用四维信息载体的概念来描述作物生长发育过程中的时空信息，而以时间轴串联起不同生长期的作物三维模型构成的模型序列，可称为作物的四维表型。

当前作物表型组学的绝大部分研究的目标和问题出口仍然是一维表型，但随着计算机视觉和人工智能技术的蓬勃发展，二维表型和三维表型相关的研究和工具逐渐增多，这些为四维表型研究的实施提供了重要的技术支持和数据基础，而承载着作物全生育期时空信息的四维表型会成为未来的作物表型组学研究的目标和育种家们的重要工具。

## 4.3 海量的作物三维模型将为作物模拟生长和模拟育种提供重要数据基础

作物生长模拟是用动态与定量的方式描述作物生长发育和产量的形成过程，同时也描述了其对环境的反应[106]，传统的作物模拟生长模型一般可分为两类，一类是基于规则的作物生长可视化模型，如L系统等[135]；另一类是基于模拟生长模型的数量化仿真，此类研究很多，最早可以追溯到1965年，荷兰De Wit[136]对玉米冠层的光合速率进行了研究，并使用计算机进行了仿真，开启了探索作物生理生态过程的数量分析与模拟。上述两类作物模拟生长方法的共同之处是依据规则或模型来解决问题，即解决模型驱动问题。这类方法需要有一个前提，即模型或规则是正确的或基本正确的，然而，作物的生长是在复杂的环境中和多样的遗传背景下进行的，绝大多数的模型或规则很难做到具有普适性。

大数据和人工智能技术的到来为解决问题提供了新的途径。计算机技术、传感器技术和计算视觉技术的飞速发展为在农业领域对各类作物在不同环境下能够进行三维重构提供了重要的技术保障。当作物三维模型日渐增多、重构精度不断

提高的时候，数据驱动的作物模拟生长技术会呼之欲出，进而会推动大数据驱动下作物模拟育种技术的高速发展。

## 4.4 作物三维重构技术将成为智慧农业快速发展重要推动力之一

智慧农业是以信息为载体，通过物联网、大数据、人工智能等技术手段，与农业问题深度融合，实现农业领域的智能决策、智能控制的一种新的生产方式，是农业从数字化到网络化再到智能化的高级阶段[137]。农作物研究的核心问题是育种和耕作，为了在智慧农业观念和技术的加持下进行高效育种与合理耕作，孙凯[138]基于多目立体视觉对大豆植株进行了三维重构，并量化了多个冠层水平的表型，进而对大豆种植密度进行了优化，实现了从虚拟植株到反演出优化种植密度的全过程，为智能管理和智能决策提供重要信息；Bietresato 等[139]基于激光雷达 3D 视觉系统对田间作物实现了生长期的全程监控，自动测量了株高、冠幅和叶面积指数等多个冠层指标，弥补了二维图像视觉技术反馈信息不全的问题，使得田间诊断更准确更可靠，为智慧决策提供了重要参考。此外，大量的基于三维重构提取的作物表型指标为该表型的分子机理研究提供了重要的高准确性和高通量的表型信息，进一步的关联分析和遗传定位将成为分子育种和智慧育种的重要支撑。

当前，作物三维重构技术已融入了作物学研究的各个方面，无论是在育种还是在耕作方面都发挥着越来越大的作用。随着现代计算机技术、三维视觉技术和人工智能算法的进一步发展，作物三维重构技术上瓶颈问题将被攻克，作物三维重构技术将为智慧育种和智能耕作提供越来越多的重要信息，将成为推动智慧农业发展的重要技术支持。

**参考文献：**

[ 1 ] 李伟. 高通量作物表型检测关键技术研究与应用[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.
LI W. Research and application of key techniques for high-throughput crop phenotypic detection [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2017.

[ 2 ] 张慧春, 周宏平, 郑加强, 等. 植物表型平台与图像分析技术研究进展与展望[J]. 农业机械学报, 2020, 51(3): 1-17.
ZHANG H, ZHOU H, ZHENG J, et al. Research progress and prospect in plant phenotyping platform and image analysis technology[J]. Transactions of the CSAM, 2020, 51(3): 1-17.

[ 3 ] 师翊. 基于点云的苹果树冠层光照分布与生长过程数字化关键技术研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
SHI Y. Key technologies of apple tree canopy illumination distribution and growth process digitization based on point cloud [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019.

[ 4 ] 左超, 张晓磊, 胡岩, 等. 3D 真的来了吗?——三维结构光传感器漫谈[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(3): 9-53.
ZUO C, ZHANG X, HU Y, et al. Has 3D finally come of age? ——An introduction to 3D structured-light sensor[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(3): 9-53.

[ 5 ] 张建, 李宗南, 张楠, 等. 基于实测数据的作物三维信息获取与重建方法研究进展[J]. 华中农业大学学报, 2013, 32(4): 126-134.
ZHANG J, LI Z, ZHANG N, et al. Advances in 3D information collection and reconstruction of crop based on the measured data[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2013, 32(4): 126-134.

[ 6 ] 刘刚, 司永胜, 冯娟. 农林作物三维重建方法研究进展[J]. 农业机械学报, 2014, 45(6): 38-46, 19.
LIU G, SI Y, FENG J. 3D reconstruction of agriculture and forestry crops[J]. Transactions of the CSAM, 2014, 45(6): 38-46, 19.

[ 7 ] 李林. 基于点云的农作物三维重建研究现状及展望[J]. 农业开发与装备, 2019(10): 99-101.
LI L. Research status and prospect of crop 3D reconstruction based on point cloud [J]. Agricultural Development and Equipment, 2019(10): 99-101.

[ 8 ] LI L, ZHANG Q, HUANG D. A review of imaging techniques for plant phenotyping[J]. Sensors, 2014, 14: 20078-20111.

[ 9 ] WULDER M A, WHITE J C, NELSON R F, et al. Lidar sampling for large-area forest characterization: A review[J]. Remote Sensing Environment, 2012, 121: 196-209.

[10] 郭俊, 牛铮 . 植被三维建模及应用进展[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(10): 26-29.
GUO J, NIU Z. Progress in 3D modeling and visualization of vegetation[J]. Computer Engineering and Applications, 2009, 45(10): 26-29.
[11] 赵春江, 王功明, 郭新宇, 等 . 基于交互式骨架模型的玉米根系三维可视化研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(9): 1-6.
ZHAO C, WANG G, GUO X, et al. 3D visualization of corn root system based on interactive framework model[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(9): 1-6.
[12] 方慧, 胡令潮, 何任涛, 等 . 植物三维信息采集方法研究[J]. 农业工程学报, 2012, 28(3): 142-147.
FANG H, HU L, HE R, et al. Research on plant three-dimensional information acquisition method[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(3): 142-147.
[13] RAUMONEN P, KAASALAINEN S, KAASALAINEN M, et al. Approximation of volume and branch size distribution of trees from laser scanner data[J]. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2011, 38(5): 79-84.
[14] PAULUS S, SCHUMANN H, KUHLMANN H, et al. High-precision laser scanning system for capturing 3D plant architecture and analysing growth ofcereal plants[J]. Biosystems Engineering, 2014, 121(18):1-11.
[15] WU S, WEN W, WANG Y, et al. MVS-pheno: A portable and low-cost phenotyping platform for maize shoots using multiview stereo 3D reconstruction[J]. Plant Phenomics, 2020, 2020(2): 1-17.
[16] 刘占凤, 苏中滨, 郑萍, 等 . 可控式大豆拓扑结构建模及其可视化模拟的方法[J]. 农机化研究, 2008(1): 183-185.
LIU Z, SU Z, ZHENG P, et al. Methods on controllable soybean topology structure modeling and its visualization study[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2008(1): 183-185.
[17] 赵丽丽, 温维亮, 彭亚宇, 等 . 幼苗期油菜几何造型研究[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(23): 1085-1087.
ZHAO L, WEN W, PENG Y, et al. Geometric modeling of *Brassica campestris* L. during seedling stage[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011, 39(23): 14005-14007.
[18] 彭永石 . 基于双目立体视觉的番茄三维信息的测量方法[C]// 中国农业工程学会学术年会 . 北京, 中国: 中国农业工程学会, 2007.
PENG Y. Measurement method of tomato 3d information based on binocular stereo vision[C]// Bi-annual Conference of Chinese Society of Agricultural Engineering. Beijing, China: Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007.
[19] 胡秀珍 . 梨树枝干模型构建与三维实现[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2011.
HU X. 3D Visualization of trunk and branch model of pear tree[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2011.
[20] 王菲, 张社奇, 李丙智, 等 . 高纺锤形苹果树三维重建和光照特性的评价[J]. 北方园艺, 2012(6): 10-13.
WANG F, ZHANG S, LI B, et al. Three-dimensional reconstruction of trees trained to tall spindle shape and assessment of light characteristics[J]. Northern Horticulture, 2012(6): 10-13.
[21] 郭凯敏 . 基于双目立体视觉三维重建方法的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016.
GUO K. Research on the method of 3D reconstruction based on binocular stereo vision[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2016.
[22] NGUYEN T T, SLAUGHTER D C, TOWNSLEY B, et al. Comparison of structure-from-motion and stereo vision techniques for full in-field 3D reconstruction and phenotyping of plants: An investigation in sunflower[C]// ASABE International Meeting. St. Joseph, USA: The American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2016.
[23] DUAN T, CHAPMAN S C, HOLLAND E, et al. Dynamic quantification of canopy structure to characterize early plant vigour in wheat genotypes[J]. Journal of Experimental Botany, 2016, 67(15): 4523-4534.
[24] HUI F, ZHU J, HU P, et al. Image-based dynamic quantification and high-accuracy 3D evaluation of canopy structure of plant populations[J]. Annals of Botany, 2018, 121(5): 1079-1088.
[25] BISKUP B, SCHARR H, SCHURR U, et al. A stereo imaging system for measuring structural parameters of plant canopies[J]. Plant Cell & Environment, 2010, 30 (10): 1299-1308.
[26] SHAFIEKHANI A, KADAM S, FRITSCHI F B, et al. Vinobot and Vinoculer: Two robotic platforms for high-throughput field phenotyping[J]. Sensors, 2017, 17 (1): 214.
[27] 尹宏鹏, 陈波, 柴毅, 等 . 基于视觉的目标检测与跟踪综述[J]. 自动化学报, 2016, 42(10): 1466-1489.
YI H, CHEN B, CHAI Y, et al. Vision-based object detection and tracking: A review[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2016, 42(10): 1466-1489.
[28] 肖伯祥, 郭新宇, 王纪华, 等 . 玉米叶片形态建模与网格简化算法研究[J]. 中国农业科学, 2007, 40(4):

693-697.
XIAO B, GUO X, WANG J, et al. Maize leaf morphological modeling and mesh simplification of surface[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(4): 693-697.

[29] 程锦, 劳彩莲. 基于分段曲率的玉米植株三维结构的重建[J]. 中国农学通报, 2009, 25(24): 538-543.
CHENG J, LAO C. Three-dimensional reconstruction of maize stand based on subsegmentation on leaf midrib curvature calculation[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(24): 538-543.

[30] YOUNG J, DORR G J, HANAN J, et al. Surface reconstruction of wheat leaf morphology from three-dimensional scanned data[J]. Functional Plant Biology, 2015, 42(5): ID 444.

[31] SUN S, LI C, PATERSON A H, et al. In-field high throughput phenotyping and cotton plant growth analysis using LiDAR[J]. Frontiers in Plant Science, 2018, 9: ID PMC5786533.

[32] 胡鹏程, 郭焱, 李保国, 等. 基于多视角立体视觉的植株三维重建与精度评估[J]. 农业工程学报, 2015, 31(11): 209-214.
HU P, GUO Y, LI B, et al. Three-dimensional reconstruction and its precision evaluation of plant architecture based on multiple view stereo method[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(11): 209-214.

[33] LEE K H, EHSANI R. Comparison of two 2D laser scanners for sensing object distances, shapes, and surface patterns[J]. Computers & Electronics in Agriculture, 2008, 60(2): 250-262.

[34] OMASA K, KONISHI A. 3D lidar imaging for detecting and understanding plant responses and canopy structure[J]. Journal of Experimental Botany, 2006, 58(4): 881-898.

[35] 陆声链, 李帼, 吴升. 实测数据驱动的小型植物三维重建研究[J]. 郑州大学学报(理学版), 2017, 49(3): 84-87.
LU S, LI G, WU S. Data-driven 3D reconstruction of small plant structure[J]. Journal of Zhengzhou University(Natural Science Edition), 2017, 49(3): 84-87.

[36] 方志力, 温维亮, 郭新宇, 等. 基于Kinect的三维玉米植株骨架提取[J]. 系统仿真学报, 2017, 29(3): 524-530.
FANG Z, WEN W, GUO X, et al. Skeleton extraction from three-dimensional maize based on Kinect[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(3): 524-530.

[37] VÁZQUEZ-ARELLANO M, GRIEPENTROG H, REISER D, et al. 3-D imaging systems for agricultural applications—A review[J]. Sensors, 2016, 16(5): ID 618.

[38] MORENO H, VALERO C, JOSÉ MARÍA BENGOCHEA-GUEVARA, et al. On-ground vineyard reconstruction using a LiDAR-based automated system[J]. Sensors, 2020, 20(4): ID 4.

[39] ZHU B, LIU F, XIE Z, et al. Quantification of light interception within image-based 3-D reconstruction of sole and intercropped canopies over the entire growth season[J]. Annals of Botany, 2020, 126(4): ID 4.

[40] BURGESS A J, RETKUTE R, POUND M P, et al. Image-based 3D canopy reconstruction to determine potential productivity in complex multi-species crop systems[J]. Annals of Botany, 2017, 119(4): 517-532.

[41] 赵春江. 植物表型组学大数据及其研究进展[J]. 农业大数据学报, 2019, 1(2): 5-18.
ZHAO C. Big data of plant phenomics and its research progress[J]. Journal of Agricultrual Big Data, 2019, 1(2): 5-18.

[42] METZNER R, EGGERT A, DUSSCHOTEN DVAN, et al. Direct comparison of MRI and X-ray CT technologies for 3D imaging of root systems in soil: Potential and challenges for root trait quantification[J]. Plant Methods, 2015, 11(1): 1-11.

[43] LIVINGSTON D, TUONG T, NOGUEIRA M, et al. Three-dimensional reconstruction of soybean nodules provides an update on vascular structure[J]. American journal of Botany, 2019, 106(3): 507-513.

[44] ZHU R, SUN K, YAN Z, et al. Analysing the phenotype development of soybean plants using low-cost 3D reconstruction[J]. Scientific Reports, 2020, 10: ID 7055 (2020).

[45] MA X, ZHU K, GUAN H, et al. Calculation method for phenotypic traits based on the 3D reconstruction of maize canopies[J]. Sensors, 2019, 19(5): ID 1201.

[46] THAPA S, ZHU F, WALIA H, et al. A novel LiDAR-based instrument for high-throughput, 3D measurement of morphological traits in maize and sorghum[J]. Sensors, 2018, 18(4): ID 1187.

[47] 苏伟, 蒋坤萍, 郭浩, 等. 地基激光雷达提取大田玉米植株表型信息[J]. 农业工程学报, 2019, 35(10): 125-130.
SU W, JIANG K, GUO H, et al. Extraction of phenotypic information of maize plants in field by terrestrial laser scanning[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(10): 125-130.

[48] 李抒昊, 关海鸥, 于崧, 等. 基于FastSCAN玉米整株三维重构及参数计算方法[J]. 农机化研究, 2018, 40(4): 162-166.

LI S, GUAN H, YU S, et al. Whole 3D reconstruction based on FastSCAN corn and parameter calculation method[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(4): 162-166.

[49] 王勇健, 温维亮, 郭新宇, 等. 基于点云数据的植物叶片三维重建[J]. 中国农业科技导报, 2014, 16(5): 83-89.
WANG Y, WEN W, GUO X, et al. Three-dimensional reconstruction of plant leaf blade based on point cloud data[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2014, 16(5): 83-89.

[50] 刘睿, 刘婷, 董润茹, 等. 基于地基激光雷达数据的单株玉米三维建模[J]. 中国农业大学学报, 2014, 19(3): 196-201.
LIU R, LIU T, DONG R, et al. 3D modeling of maize based on terrestrial LiDAR point cloud data[J]. Journal of China Agricultural University, 2014, 19(3): 196-201.

[51] 李辉. 基于虚拟双目视觉的玉米叶片三维重建方法[J]. 科技通报, 2016, 32(5): 96-101.
LI H. 3D reconstruction of maize leaves based on virtual visual technology[J]. Bulletin of Science and Technology, 2016, 32(5): 96-101.

[52] 王传宇, 赵明, 阎建河, 等. 基于双目立体视觉技术的玉米叶片三维重建[J]. 农业工程学报, 2010, 26(4): 198-202.
WANG C, ZHAO M, YAN J, et al. Three-dimensional reconstruction of maize leaves based on binocular stereovision system[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(4): 198-202.

[53] 宋祺鹏, 唐晶磊, 辛菁. 基于生长模型的苗期大豆植株三维重建[J]. 计算机工程, 2017, 43(5): 275-280.
SONG Q, TANG J, XIN J. 3-dimensional reconstruction for soybean plant of seedling stage based on growth model[J]. Computer Engineering, 2017, 43(5): 275-280.

[54] 谢秋菊, 苏中滨, 孙红敏. 大豆叶片三维重建及形变技术研究[J]. 农机化研究, 2011, 33(9): 220-223.
XIE Q, SU Z, SUN H. Research on technology for soybean leaf 3D reconstruction and deformation modeling[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(9): 220-223.

[55] 郑萍, 苏中滨, 康丽. 基于生长方程的虚拟大豆拓扑结构建模方法的研究[J]. 农机化研究, 2006(7): 193-195.
ZHENG P, SU Z, KANG L. Modeling of virtual soybean topology based on growth function[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2006(7): 193-195.

[56] 史维杰, 张昊平, 郝雅洁, 等. 基于视觉三维重建的作物表型分析[J]. 湖北农业科学, 2019, 58(16): 125-128.
SHI W, ZHANG W, HAO Y, et al. Crop phenotypic analysis based on visual 3D reconstruction [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2019, 58(16): 125-128.

[57] DUAN T, CHAPMAN S C, HOLLAND E, et al. Dynamic quantification of canopy structure to characterize early plant vigour in wheat genotypes[J]. Journal of Experimental Botany, 2016, 67(15): 4523-4534.

[58] FANG W, FENG H, YANG W N, et al. High-throughput volumetric reconstruction for 3D wheat plant architecture studies[J]. Journal of Innovative Optical Health Sciences, 2016, 9(5): ID 1650037.

[59] 胡少军, 何东健, 耿楠, 等. 基于图像处理的小麦叶片形态的三维重建[J]. 农业工程学报, 2007, 23(1): 150-154.
HU S, HE D, GENG N, et al. 3D reconstruction of wheat lamina shape based on image processing[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(1): 150-154.

[60] 李书钦. 小麦生长模拟模型与三维可视化技术研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2017.
LI S. Research on wheat growth simulation model and 3D visualization technology[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2017.

[61] 李书钦, 刘海龙, 诸叶平,等. 基于实测数据和NURBS曲面的小麦叶片三维可视化[J]. 福建农业学报, 2016, 31(7): 777-782.
LI S, LIU H, ZHU Y, et al. 3-D visualization of wheat leaves using measured data and NURBS surface[J]. Fujian Journal of Agricultural Science, 2016, 31(7): 777-782.

[62] 李书钦, 诸叶平, 刘海龙,等. 基于NURBS曲面的小麦叶片三维可视化研究与实现[J]. 中国农业科技导报, 2016, 18(3): 89-95.
LI S, ZHU Y, LIU H, et al. Research and realization of wheat leaf three-dimensional visualization based on NURBS surface[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2016, 18(3): 89-95.

[63] ZHANG H, WANG Q, ZHANG H, et al. Wheat three-dimensional reconstruction and visualization system[C]// International Conference on Computer and Computing Technologies in Agriculture. Berlin, German: Springer, 2012: 234-243.

[64] KEMPTHORNE D M, TURNER I W, BELWARD J A, et al. Surface reconstruction of wheat leaf morphology from three-dimensional scanned data[J]. Functional Plant Biology, 2015, 42(5): 444-451.

[65] 柏月, 汪木兰, 朱昊, 等. 基于双目视觉的棉花三维重

构技术[J]. 机械设计与制造工程, 2017, 46(11): 150-154.
BAI Y, WANG M, ZHU H, et al. 3D reconstruction technology of the cotton image based on binocular vision[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2017, 46(11): 150-154.

[66] 韩大龙. 基于双目立体视觉技术的棉株动态识别研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2014.
HAN D. Cotton plant dynamic recognition system based on the binocular stereo vision technology[D]. Shihezi: Shihezi University, 2014.

[67] 杨娟, 赵明, 潘学标. 基于NURBS和VC++6.0的棉花生长可视化研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(10): 159-162.
YANG J, ZHAO M, PAN X. Visualization of cotton growth based on NURBS and VC++6.0[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(10): 159-162.

[68] 陈超, 潘学标, 张立祯, 等. 棉花地上部生长的功能-结构模型研究[J]. 作物学报, 2012, 38(12): 2237-2245.
CHEN C, PAN X, ZHANG L, et al. Functional and structural model for above-ground growth in cotton[J]. Acta Agronomica Sinica, 2012, 38(12): 2237-2245.

[69] 宋时德, 李淼, 张健, 等. 面向以多视角立体匹配获取的植株三维点云的去噪方法[J]. 计算机应用, 2017 (S2): 141-145.
SONG S, LI M, ZHANG J, et al. Denoising method of 3D point clouds based on multi-angle stereo matching[J]. Journal of Computer Applications, 2017(S2): 141-145.

[70] GUO Q, WU F, PANG S, ZHAO X Q, et al. Crop 3D—A LiDAR based platform for 3D high-throughput crop phenotyping[J]. Science China Life Sciences, 2018, 61 (3): 1-12.

[71] 孟耀华, 荣丽红, 仝志民, 等. 基于计算机视觉的水稻三维重建方法[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2014, 26(4): 80-82.
MENG Y, RONG L, TONG Z, et al. Rice 3D reconstruction based on computer vision[J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2014, 26(4): 80-82.

[72] 何火娇, 杨红云, 唐建军, 等. 水稻植株虚拟生长可视化系统设计及其实现[J]. 系统仿真学报, 2009, 21 (14): 4393-4396.
HE H, YANG H, TANG J, et al. Design and realization of virtual growth visualization system for rice plant[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(14): 4393-4396.

[73] 徐其军, 汤亮, 顾东祥, 等. 基于形态参数的水稻根系三维建模及可视化[J]. 农业工程学报, 2010, 26(10): 188-194.
XU Q, TANG L, GU D, et al. Architectural parameter-based three dimensional modeling and visualization of rice roots[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(10): 188-194.

[74] 汪丽萍, 何火娇, 杨红云. 水稻叶片三维建模与叶色渲染[J]. 计算机工程与应用, 2017, 53(24): 187-190.
WANG L, HE H, YANG H. Three-dimensional shape modeling and real-time color rendering of rice leaf[J]. Computer Engineering and Applications, 2017, 53(24): 187-190.

[75] 张楠. 水稻序列图像在三维可视化建模及营养诊断中的应用研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2013.
ZHANG N. Sequence rice images in the research of 3D visualization shape and nutrition diagnosis[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2013.

[76] CLARK RT, MACCURDY RB, JUNG JF, et al. Three-dimensional root phenotyping with a novel imaging and software platform[J]. Plant Physiology, 2011, 156 (2): 455-465.

[77] 吴茜. 基于计算机视觉的水稻植株三维重建[D]. 南昌: 江西农业大学, 2012.
WU Q. Computer vision based 3D reconstruction of rice[D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2012.

[78] 史蒲娟, 翟瑞芳, 常婷婷, 等. 基于单目视觉和激光扫描技术的油菜植株模型重建及株型参数测量[J]. 华中农业大学学报, 2017, 36(3): 63-68.
SHI P, ZHAI R, CHANG T, et al. 3D model generation and phenotypic measurement of rapeseed plant based on monocular visio and laser scanning technology[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2017, 36 (3): 63-68.

[79] 方慧, 杜朋朋, 胡令潮, 等. 基于可视化类库的植株三维形态配准方法及点云可视化[J]. 农业工程学报, 2013, 29(22): 180-188.
FANG H, DU P, HU L, et al. VTK-based plant 3D morphological visualization and registration[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(22): 180-188.

[80] 李冬, 林宝刚, 史同鑫, 等. 油菜植株三维结构的测量与可视化建模研究[J]. 浙江农业学报, 2013, 25(5): 926-932.
LI D, LIN B, SHI T, et al. Modeling and visualization of 3D architecture of oilseed rape (*Brassica napus* L.)[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2013, 25 (5): 926-932.

[81] 欧中斌. 油菜生长可视化仿真关键技术研究[D]. 长

沙: 湖南农业大学, 2007.
OU Z. Studies on the key technology of rapeseed (Brassica napus L.) Visual Growth[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2007.
[82] 岳延滨. 油菜植株形态结构模型及可视化[J]. 南京: 南京农业大学, 2010.
YUE Y. The morphological structural model and visualization of rapeseed (*Brassica napus* L.) plant[J]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2010.
[83] RAN N L, FILIN S, EIZENBERG H. Plant growth parameter estimation from sparse 3D reconstruction based on highly-textured feature points[J]. Precision Agriculture, 2013, 14(6): 586-605.
[84] 董乔雪, 王一鸣, 杨丽丽, 等. 番茄三维形态结构的参数提取及模拟[J]. 农业工程学报, 2010, 26(S2):38-42.
DONG Q, WANG Y, YANG L, et al. Parameter identification of tomato 3D architectural model and simulation[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(S2): 38-42.
[85] 袁晓敏, 温维亮, 郭新宇, 等. 番茄群体冠层形态结构三维模拟——基于实测数据[J]. 农机化研究, 2012, 34(2): 172-176.
YUAN X, WEN W, GUO X, et al. Three-dimensional simulation of tomato canopy morphological structure based on measured data[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012, 34(2): 172-176.
[86] 袁晓敏, 赵春江, 温维亮,等. 番茄植株三维形态精确重构研究[J]. 农业机械学报, 2012, 43(12): 204-210.
YUAN X, ZHAO C, WEN W, et al. Detailed modeling of 3-D configuration of tomato plant[J]. Transactions of the CSAM, 2012, 43(12): 204-210.
[87] 辛龙娇, 徐立鸿, 李大威, 等. 基于参数L-系统的温室番茄植株的三维重建[J]. 现代农业科技, 2014(3): 340-343.
XIN L, XU L, LI D, et al. 3D reconstruction of greenhouse tomato plant based on parametric L-system[J]. Modern Agricultural Sciences and Technology, 2014 (3): 340-343.
[88] 刘刚, 张雪, 宗泽,等. 基于深度信息的草莓三维重建技术[J]. 农业机械学报, 2017, 48(4): 160-165.
LIU G, ZHANG X, ZONG Z, et al. 3D reconstruction of strawberry based on depth information[J]. Transactions of the CSAM, 2017, 48(4): 160-165.
[89] 张雪, 郭彩玲, 宗泽,等. 基于轮廓分割的草莓叶片三维建模[J]. 农业工程学报, 2017, 33(S1): 206-211.
ZHANG X, GUO C, ZONG Z, et al. 3D reconstruction of strawberry leaves based on contour segmentation[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(S1): 206-211.
[90] 赵丽丽, 温维亮, 郭新宇, 等. 草莓三维形态几何建模与真实感绘制[J]. 中国农学通报, 2011, 27(6): 201-205.
ZHAO L, WEN W, GUO X, et al. Techniques for modeling 3-D shape and realistic rendering of strawberry[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27 (6): 201-205.
[91] 祁力钧, 梁霞, 冀荣华,等. 基于超声波传感技术的温室草莓冠层三维重构与测量[J]. 农业机械学报, 2013, 44(9): 199-203.
QI L, LIANG X, JI R, et al. 3-D reconstruction and measurement of greenhouse strawberry canopy based on ultrasonic sensors[J]. Transactions of the CSAM, 2013, 44(9): 199-203.
[92] 陈学峰, 郭新宇, 周淑秋,等. 基于仿射变换的植物切片图像配准及三维重建[J]. 农机化研究, 2009, 31(7): 82-85.
CHEN X, GUO X, ZHOU S, et al. Plant slices' image registration based on affine transformation and 3D reconstruction[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(7): 82-85.
[93] 胡鹏程, 郭焱, 李保国, 等. 基于多视角立体视觉的植株三维重建与精度评估[J]. 农业工程学报, 2015, 31 (11): 209-214.
HU P, GUO Y, LI B, et al. Three-dimensional reconstruction and its precision evaluation of plant architecture based on multiple view stereo method[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(11): 209-214.
[94] 杨沛, 何东健. 基于参数L-系统的黄瓜苗期生长可视化研究[J]. 农机化研究, 2010, 32(8): 181-185.
YANG P, HE D. A study on visualization of cucumber growth at seedling stage based on parametric L-system[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(8): 181-185.
[95] 方小勇, 郭新宇, 王丹虹, 等. 黄瓜叶几何造型研究[J]. 计算机工程与应用, 2006, 42(32): 183-184.
FANG X, GUO X, WANG D, et al. Geometry modeling of cucumber leaf[J]. Computer Engineering and Applications, 2006, 42(32): 183-184.
[96] 杨亮, 郭新宇, 陆声链, 等. 基于多幅图像的黄瓜叶片形态三维重建[J]. 农业工程学报, 2009, 25(2): 141-144.
YANG L, GUO X, LU S, et al. 3D morphological reconstruction of cucumber leaf based on multiple images[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(2): 141-144.
[97] 陆声链, 李帼, 吴升. 实测数据驱动的小型植物三维重建研究[J]. 郑州大学学报(理学版), 2017, 49(3): 84-87.

LU S, LI G, WU S. Data-driven 3D reconstruction of small plant structure[J]. Journal of Zhengzhou University(Natural Science Edition), 2017, 49(3): 84-87.

[98] 乔桂新, 温维亮, 彭亚宇, 等. 辣椒植株三维重构与可视化研究[J]. 计算机工程与设计, 2012, 33(4): 1499-1503.
QIAO G, WEN W, PENG Y, et al. Research on three-dimensional geometric morphological modeling and visualization of pepper[J]. Computer Engineer and Design, 2012, 33(4): 1499-1503.

[99] 赵泽英, 岳延滨, 聂克艳, 等. 辣椒叶片形态模拟模型研究(英文)[J]. 贵州农业科学. 2012, 40(5): 182-186.
ZHAO Z, YUE Y, NIE K, et al. Study on morphological simulation models of chili pepper leaves[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2012, 40(5): 182-186.

[100]郭明伟. 基于智能虚拟器官的植物建模关键技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
GUO M. Research on key technologies of plant modelling based on intelligent virtual organ[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.

[101]温维亮, 郭新宇, 王勇健, 等. 葡萄树地上部形态结构数据获取方法[J]. 农业工程学报, 2015, 31(22): 161-168.
WEN W, GUO X, WANG Y, et al. Morphological and structural data acquisition for above-ground part of grapevine[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(22): 161-168.

[102]温维亮, 郭新宇, 肖伯祥, 等. 基于模板的生菜参数化几何建模方法[J]. 中国农学通报, 2011, 27(6): 459-463.
WEN W, GUO X, XIAO B, et al. The parametric geometric modeling method for lettuce based-template[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(6): 459-463.

[103]孔繁爽, 伍艳莲, 姜海燕. 基于图像特征提取的生菜形态可视化建模[J]. 安徽农业科学, 2015(24): 265-268.
KONG F, WU Y, JIANG H. Visual modeling of lettuce form based on image feature extraction[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2015, 43(24): 265-268, 278.

[104]王芸芸, 温维亮, 郭新宇,等. 基于球B样条函数的烟草叶片虚拟实现[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 230-235.
WANG Y, WEN W, GUO X, et al. Virtual realization of tobacco leaves based on ball B-spline function[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(1): 230-235.

[105]王芸芸, 温维亮, 郭新宇, 等. 烟草地上部植株三维重构与可视化[J]. 中国农业科学, 2013, 46(1): 37-44.
WANG Y, WEN W, GUO X, et al. Research on three-dimensional reconstruction and visualization of above-ground tobacco plant[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(1): 37-44.

[106]ZHAO L, ZHAO C, ZHOU L, et al. Analysis on rice production in China[J]. Agricultural Science & Technology, 2016, 17(1): 78-80, 105.

[107]张军, 陆继海. 水稻高产栽培技术分析[J]. 吉林农业, 2010(9): 111.
ZHANG J, LU J. Analysis on high yield cultivation techniques of rice[J]. Jilin Agriculture, 2010(9): 111.

[108]章秀福, 王丹英, 方福平, 等. 中国粮食安全和水稻生产[J]. 农业现代化研究, 2005, 26(2): 85-88.
ZHANG X, WANG D, FANG F, et al. Food safety and rice production in China[J]. Research of Agricultural Modernization, 2005, 26(2): 85-88.

[109]崔太昌, 陈峰, 李华东, 等. 山东省水稻产业发展现状与科技需求分析[J]. 山东农业工程学院学报, 2015, 32(6): 24-26.
CUI T, CHEN F, LI H, et al. Analysis on the development status of rice industry and the demand of science and technology in Shandong province[J]. The Journal of Shandong Agricultural Engineering College, 2015, 32(6): 24-26.

[110]刘江南, 魏军华, 向宝玉. 试论油菜种植技术的应用与推广[J]. 新农业, 2018(1): 35-37.
LIU J, WEI J, XIANG B. On the application and promotion of rapeseed planting technology[J]. New Agricultural, 2018(1): 35-37.

[111]韩民. 旱地番茄优质高产栽培技术分析[J]. 科学与财富, 2017(8): 170.
HAN M. Analysis on cultivation techniques of high quality and high yield of tomato in dry land[J]. Science & Wealth, 2017(8): 170.

[112]温维亮, 赵春江, 郭新宇, 等. 基于t分布函数的玉米群体三维模型构建方法[J]. 农业工程学报, 2018, 34(4): 192-200.
WEN W, ZHAO C, GUO X, et al. Construction method of three-dimensional model of maize colony based on t-distribution function[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(4): 192-200.

[113]牛顺义. 基于双目视觉的棉花识别与定位系统研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2016.
NIU S. Cotton identification and positioning system based on binocular vision[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2016.

[114]周娟, 周治国, 陈兵林, 等. 基于形态模型的棉花

(*Gossypium hirsutum* L.)虚拟生长系统研究[J]. 中国农业科学, 2009, 42(11): 3843-3851.

ZHOU J, ZHOU Z, CHEN B, et al. Morphogenesis model-based virtual growth system of cotton (*Gossypium hirsutum* L.)[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(11): 3843-3851.

[115] 孟军, 陈温福, 王嘉宇. 水稻群体冠层三维结构的计算机模拟分析[J]. 沈阳农业大学学报, 2007, 38(1): 8-13.

MENG J, CHEN W, WANG J. Computer simulation of 3-dimentional structure of rice canopy[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2007, 38(1): 8-13.

[116] 冯佳睿, 马晓丹, 关海鸥, 等. 基于深度信息的大豆株高计算方法[J]. 光学学报, 2019, 39(5): 1-11.

FENG J, MA X, GUAN H, et al. Calculation method of soybean plant height based on depth information[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(5): 1-11.

[117] 张洁, 杨伟伟, 容新民,等. 构建不同树形葡萄树体结构的三维虚拟模型[J]. 新疆农业科学, 2021, 58 (2): 11.

ZHANG J, YANG W, RONG X, et al. Digital study on the canopy structure of grape with different tree shapes[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2021, 58 (2): 11.

[118] BIETRESATO M, CARABIN G, VIDONI R, et al. Evaluation of a LiDAR-based 3D-stereoscopic vision system for crop-monitoring applications[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 124: 1-13.

[119] VAN DUSSCHOTEN, METZNER R, KOCHS J, et al. Quantitative 3D analysis of plant roots growing in soil using magnetic resonance imaging[J]. Plant physiology, 2016, 170(3): 1176-1188.

[120] MAIRHOFER S, ZAPPALA S, TRACY S, et al. Recovering complete plant root system architectures from soil via X-ray μ-computed tomography[J]. Plant methods, 2013, 9(1): 1-7.

[121] PFEIFER J, KIRCHGESSNER N, COLOMBI T, et al. Rapid phenotyping of crop root systems in undisturbed field soils using X-ray computed tomography[J]. Plant methods, 2015, 11(1): 1-8.

[122] PFLUGFELDER D, METZNER R, DUSSCHOTEN DVAN, et al. Non-invasive imaging of plant roots in different soils using magnetic resonance imaging (MRI)[J]. Plant Methods, 2017, 13(1): 1-9.

[123] LE MARIÉ C, KIRCHGESSNER N, MARSCHALL D, et al. Rhizoslides: Paper-based growth system for non-destructive, high throughput phenotyping of root development by means of image analysis[J]. Plant Methods, 2014, 10(1): 1-16.

[124] GALKOVSKYI T, MILEYKO Y, BUCKSCH A, et al. GiA Roots: Software for the high throughput analysis of plant root system architecture[J]. BMC Plant Biology, 2012, 12(1): 116.

[125] METZNER R, DUSSCHOTEN DVAN, BÜHLER J, et al. Belowground plant development measured with magnetic resonance imaging (MRI): Exploiting the potential for non-invasive trait quantification using sugar beet as a proxy[J]. Frontiers in Plant Science, 2014, 5: 469.

[126] ZAPPALA S, HELLIWELL J R, TRACY S R, et al. Effects of X-ray dose on rhizosphere studies using X-ray computed tomography[J]. PloS One, 2013, 8(6): ID e67250.

[127] 毛罕平, 刘洋, 徐静云, 等. 基于μCT的番茄穴盘苗根系结构及分布特征[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2019, 40(3): 45-51.

MAO H, LIU Y, XU J, et al. Root structure and distribution characteristics of tomato hole disk seedlings based on μCT [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2019, 40 (3): 45-51.

[128] 厉翔, 丁启朔, 陈信信, 等. 大田群体小麦根系构型3D拓扑表型的参数化[J]. 江苏农业学报, 2020, 36 (4): 142-147.

LI X, DING Q, CHEN X, et al. Parameterization of 3D topological phenotype of wheat root system architecture in field population[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2020, 36(4): 142-147.

[129] TENG X, ZHOU G, WU Y, et al. 3D Reconstruction method of rapeseed plants in the whole growth period using RGB-D camera[J]. Sensors, 2021, 21: ID 4628.

[130] GUAN X, WANG J, ZHOU Y, et al. High-throughput visible image transmission design based on the X-CT root 3D reconstruction system[C]// EAI GreeNets 2021. Dalian, China: EAI, 2021.

[131] WEN W, WANG Y, WU S, et al. 3D phytomer-based geometric modelling method for plants—The case of maize[J]. AoB Plants, 2021, 13(5): ID plab055.

[132] DONNÉ S, LUONG H, DHONDT S, et al. 3D reconstruction of maize plants in the phenoVision system[C]// Knowledge For Growth. Ghent, Belgium: UGent publication. 2016.

[133] 慧诺瑞德(北京)科技有限公司. 盆栽植物数字性状测量系统 [EB/OL]. (2020-10-04) [2021-11-01]. http://www.phenotrait.com.

[134] APELT F, BREUER D, NIKOLOSKI Z, et al. Phytotyping4D: A light-field imaging system for non-inva-

sive and accurate monitoring of spatio-temporal plant growth[J]. Plant Journal, 2015, 82: 693-706.
[135] CIESLAK M, PRUSINKIEWICZ P. Gillespie-Lindenmayer systems for stochastic simulation of morphogenesis[J]. in silico Plants, 2019, 1(1): ID diz009.
[136] DE WIT C T. Photosynthesis of leaf canopies[R]. Agnc Res Report. 1965
[137] 赵春江. 智慧农业发展现状及战略目标研究[J]. 智慧农业, 2019, 1(1): 1-7.
ZHAO C. State-of-the-art and recommended developmental strategic objectives of smart agriculture[J]. Smart Agriculture, 2019, 1(1): 1-7.
[138] 孙凯. 基于三维重构的普兰种业主栽大豆种植密度的优化研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019.
SUN K. Research on the optimization of planting density based on 3D reconstruction for soybean planted by PuLan seed company[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019.
[139] BIETRESATO M, CARABIN G, VIDONI R, et al. Evaluation of a LiDAR-based 3D-stereoscopic vision system for crop-monitoring applications[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 124: 1-13.

# Research Advances and Prospects of Crop 3D Reconstruction Technology

ZHU Rongsheng[1], LI Shuai[2], SUN Yongzhe[2], CAO Yangyang[2], SUN Kai[2], GUO Yixin[2], JIANG Bofeng[2], WANG Xueying[2], LI Yang[1], ZHANG Zhanguo[1], XIN Dawei[3], HU Zhenbang[3], CHEN Qingshan[3*]

(1. *College of Science, Northeast Agricultural University, Harbin* 150030, *China*; 2. *College of Engineering, Northeast Agricultural University*, *Harbin* 150030, *China*; 3. *College of Agronomy*, *Northeast Agricultural University*, *Harbin* 150030, *China*)

**Abstract:** Crop 3-dimensional (3D) reconstruction is one of the most fundamental techniques in crop phenomics, and is an important tool to accurately describe the holographic structure of crop morphology. 3D reconstruction models of crops are important for high-throughput crop phenotype acquisition, crop plant characteristics evaluation, and plant structure and phenotype correlation analysis. In order to promote and popularize the 3D reconstruction technology in crop phenotype research, the basic methods and application characteristics, the current advances of research and the prospects of 3D reconstruction in crops were review in this paper. Firstly, the existing methods of crop 3D reconstruction were summarized, the basic principles of each method were reviewed, the characteristics, advantages and disadvantages of each method were analyzed, the applicability of each method on the basis of the general process of crop 3D reconstruction methods were introduced, and the specific process and considerations for the implementation of each method were summarized. Secondly, the application of crop 3D reconstruction were divided into three parts: single crop reconstruction, field group reconstruction and root system, according to different target objects, and the applications of crop 3D reconstruction technology from these three perspectives were reviewed, the research advances of each method for different crop 3D reconstruction based on accuracy, speed and cost were explored, and the problems and challenges of crop 3D reconstruction in the context of different reconstruction objects were organized. Finally, the prospects of crop 3D reconstruction technology were analyzed.

**Key words:** crops; 3D reconstruction; phenotypic omics; crop root; three-dimensional scanner